

①⑨ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑪ **DE 31 15 202 A 1**

⑤ Int. Cl. 3:
F03D 7/00

⑳ Aktenzeichen:
㉔ Anmeldetag:
㉕ Offenlegungstag:

P 31 15 202.3-15
15. 4. 81
25. 11. 82

㉑ Anmelder:
Wortmann, Franz Xaver, Prof. Dr.-Ing., 7030 Böblingen, DE

㉒ Erfinder:
Antrag auf Nichtnennung

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

㉓ **Direkte mechanische Regelung von Windturbinen**

31 15 202 entfällt

DE 31 15 202 A 1

DE 31 15 202 A 1

BEST AVAILABLE COPY

Ansprüche:

- ①) Direkt wirkender Fliehkraftregler für die Drehzahlregelung von Windturbinen mit Blattverstellung, dadurch gekennzeichnet, daß der Regler als astatischer Regler bei nur geringer Überschreitung der Solldrehzahl eine auch für große Windgeschwindigkeit ausreichende Blattverstellung erzielen kann und parallel zur Reglerfeder ein Dämpfer geschaltet ist, der das Rotor-Regler-System stabilisiert.
- 2) daß zwischen Dämpfer und Reglermasse eine zusätzliche Proportionalfeder geschaltet wird.
- 3) daß als Bauelement für den Dämpfer ein Luftbalg mit passender Drosselung verwendet wird.
- 4) daß Dämpfer und Proportionalfeder durch passende Wahl der Luftbalgmaße in einem Bauelement zusammengefaßt werden.
- 5) Direktwirkender mechanischer Leistungsregler und Drehzahlwächter, dadurch gekennzeichnet, daß bei einer drehweichen Lagerung des Rotors auf der Rotorwelle ein vom Moment abhängiger Drillwinkel entsteht, der zur Blattwinkelverstellung herangezogen wird.
- 6) Leistungsregler nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Drillwinkel den Anschlag B1 des Drehzahlwächters verstellt, um die Energieausbeute im Teillastbereich zu optimieren.
- 7) Leistungsregler nach Anspruch 5 und 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Verdrillung einer Feder benutzt wird, um das Drehmoment des Rotors oberhalb des Nennmomentes durch eine Blattverstellung zu begrenzen.
- 8) Leistungsregler und Drehzahlwächter nach Anspruch 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Verstellelemente für die Teillast, für die Momentenbegrenzung und den Drehzahlwächter mechanisch unabhängig voneinander zu einer Blattverstellung führen können.

15.04.81

3115202

2

- 9) Leistungsregler nach Anspruch 5, 6 und 7, dadurch gekennzeichnet, daß die aktiven Blattverstellungen nach 5), 6) und 7) nicht sofort übertragen werden, sondern über ein Feder- und Dämpfungsglied als langsame und gedämpfte Bewegung an das Rotorblatt weitergegeben werden.
- 10) Leistungsregler nach Anspruch 5 und 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Verdrillung einer vorgespannten Feder benutzt wird, um das Drehmoment des Rotors oberhalb des Nennmomentes durch eine Blattverstellung zu begrenzen.

Direkte mechanische Regelung von Windturbinen.

Windturbinen benötigen Regeleinrichtungen um zu große Drehzahlen oder zu große Drehmomente zu vermeiden. Dabei kann man zwei unterschiedliche Aufgaben unterscheiden. Beim sogenannten Inselbetrieb, der auch als "windgeführt" bezeichnet wird, ist normalerweise die Drehzahl zur Windgeschwindigkeit proportional. Die mögliche Nutzleistung kann mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit anwachsen.

Zum Schutz der Windturbine genügt es i.a. die Drehzahl oberhalb der Nennwindgeschwindigkeit konstant zu halten. Anders ist die Situation, wenn die Windturbine mit einem elektrischen Generator an ein starkes elektrisches Netz angeschlossen ist. In diesem Fall wird die Rotordrehzahl praktisch durch die Netzfrequenz vorgegeben und festgehalten. Dadurch ergeben sich zwei neue Regelaufgaben: im Teillastbereich müssen die Rotorblätter verstellt werden um die Energieausbeute zu verbessern und oberhalb der Nennleistung muß das Nutzmoment begrenzt werden, um z.B. die Leistung konstant zu halten.

Eine direkte mechanische Regelung, die ohne Hilfsenergie und ohne wetterempfindliche Steuerungsorgane auskommt, ist wegen der erforderlichen Zuverlässigkeit und langen Lebensdauer für Windturbinen wünschenswert.

Im folgenden, vgl. Abb.1, soll eine derartige Regelung für einen Einblattrotor beschrieben werden, dessen Blatt sowohl Winkelbewegungen um eine in Spannweitenrichtung liegende Steuerachse φ als auch Schlagbewegungen β um eine senkrecht zur Rotorachse liegende Schlagachse ausführen kann. Der Einblattrotor wird hier bevorzugt, weil die Lager der φ -Achse nicht durch die großen Fliehkräfte belastet und deshalb reibungsarm sind. Der Regler liegt in Abb.1 auf der Leeseite des Rotors. Er kann genauso gut wie z.B. Abb.2 zeigt, auf der Luvseite liegen.

Wenn Schlag- und Steuerachse wie bei einem Kardangelenk senkrecht zueinander liegen kann man in bekannter Weise eine Schlagbewegung mit einer Blattverstellung um die Steuerachse dadurch koppeln, (die sogenannte δ_3 oder Rücksteuerung) daß das Blatt durch eine Steuerstange ST mit einem Punkt A verbunden ist, der zunächst fest zur Rotorachse gedacht wird. Eine solche wohlbekannte Anordnung führt zu einer passiven Selbststeuerung des Rotorblattes beim Anlaufen, bei Böeneinfall und vor allem bei erzwungenen Bewegungen der Rotorachse.

Den Punkt A kann man sich auch beweglich vorstellen z.B. als Ausgang eines Stellgliedes, das den Blattwinkel aktiv verstellt. Dies kann z.B. das klassische Fliehkraftpendel sein, das im Fall einer horizontal liegenden Rotorachse noch einen in Abb. 1 nicht gezeichneten Schwerkraftausgleich z.B. in Form einer diagonalen Koppelstange benötigt. Den Steuermomenten dieses Reglers stehen jedoch die Luftkraftmomente und die Propellermomente des Rotorblattes und die Schwerkraftmomente um die Steuerachse S gegenüber, die durch eine geschickte Wahl der Achslage genügend klein gehalten werden müssen. Die Erfahrung zeigt, daß man mit einem Fliehkraftregler, dessen Massen von etwa 5% der Rotormasse ausmachen und vernünftige Hebelarmlängen besitzen, genügend große Steuermomente erzeugen kann.

Die Regelfunktion des Fliehkraftreglers hängt stark von der Vorspannung und dem Kraftanstieg der Feder I ab, die die beiden Reglermassen gegen den Anschlag B zieht. Überschreitet die Fliehkraft der Massen M die Vorspannung der Feder bei Nenndrehzahl beginnt der Regelvorgang. Wenn der anschließende Federkraftanstieg ebenso groß ist wie der Fliehkraftanstieg, den die Massen M mit wachsendem Radius erfahren, kann der Stellweg des Reglers auch bei nur geringer Überschreitung der Nenndrehzahl unbegrenzt groß werden. Dies kennzeichnet das Verhalten eines astatischen oder Integralreglers. Ist der Federkraftanstieg oder genauer der Momentenanstieg stärker als der Anstieg des Fliehkraftmomentes, wird der Stellweg proportional zur Drehzahldifferenz. Dies charakterisiert einen statischen oder Proportionalregler.

Da Sturmwindgeschwindigkeiten die Nennwindgeschwindigkeit um das fünf bis siebenfache überschreiten ist ein großer Stellweg erforderlich, der den Blattwinkel um etwa $40 - 45^\circ$ verändern muß. Ein

Proportionalregler kommt deshalb nicht in Frage, weil meistens mit Rücksicht auf eine Resonanzanregung im gesamten System eine nahezu konstante Drehzahl eingehalten werden muß.

Ein Integralregler ist andererseits prinzipiell instabil, weil das Stellsignal seinen Maximalwert annimmt, wenn der Sollwert gerade wieder erreicht wird. Zur Abhilfe kann man das Stellsignal durch einen Dämpfer D soweit verlangsamen, daß der Rotor als Regelstrecke relativ schneller wird als der Regler. Erreicht man dies beim Nennwind, so gilt das erst recht bei höheren Windgeschwindigkeiten, weil die Einstellzeit des Rotors dann geringer wird.

Der Fliehkraftregler als Integralregler mit Dämpfung ist bereits eine brauchbare Möglichkeit um die genannte Regelaufgabe für einen großen Bereich von Windgeschwindigkeiten zu lösen. Bei schnellen Böen jedoch sollte die Regelfunktion ebenfalls schneller sein. Das läßt sich erreichen, wenn zwischen Dämpfer und Massenarm eine weitere Feder schaltet (nicht in Fig. 1 eingezeichnet). Man erhält dann eine Kombination aus Integral und Proportionalregler, wobei der Proportionalanteil wegen des Dämpfers nur vorübergehend wirksam wird.

Das genannte Regelprinzip scheitert jedoch leicht an den großen Reibkräften, die bei hydraulischen oder pneumatischen Dämpfern auftreten und für die Regelung unerwünscht sind. Erfindungsgemäß wird deshalb für das Dämpfungsglied ein Luftbalg D mit einer einstellbaren Drosselbohrung vorgeschlagen. Der Balg hat keine merkliche Reibung. Seine Federelastizität ist der Feder I parallel geschaltet. Als Feder für den Proportionalanteil kann die eingeschlossene Luftsäule dienen. Durch passende Dimensionierung und Verstärkungen kann man verhindern, daß der Balg bei Unter- oder Überdruck seine Form verliert. Da ein Balg kein Präzisionsstück zu sein braucht kann er auch sehr preiswert sein.

Zur richtigen Einstellung des Dämpfers beginnt man bei Nennwind mit hoher Dämpfung und verringert sie solange bis erste Regelschwingungen auftreten. Bei etwas größerer Dämpfung ist der Regler nahezu optimal eingestellt.

Für die zweite Aufgabe, die Leistungsregelung einer Windturbine, die mit dem Netz verbunden ist, wird folgender Weg vorgeschlagen.

Da die Drehzahl durch die Netzfrequenz eine vorgegebene Größe hat, kann lediglich das Drehmoment der Turbine geregelt werden. Der oben beschriebene Drehzahlregler wird zur Sicherheit als Drehzahlwächter beibehalten, aber so eingestellt, daß er erst oberhalb der Nennzahl wirksam werden kann.

Das Drehmoment des Rotors soll (vgl. Abb. 2) in bekannter Weise dadurch gemessen werden, daß der Rotor mit einer Hülse H auf der Rotorachse A R nochmals für sich gelagert wird und über eine drehelastische Verbindung F, z.B. eine Drillfeder, mit der Achse bzw. dem Generator verbunden ist. Jedes Drehmoment führt dann zu einem Federweg, der als Winkeldifferenz zwischen Rotorwelle R und Rotorlagerung H gemessen wird. Die Drehwinkeldifferenz soll erfindungsgemäß zu einer passenden Blattverstellung genutzt werden. Natürlich kann man die Lagerung der Hülse H und die Drillfeder auch in einem Elastomerlager zusammenfassen und bekommt dadurch auch noch eine gewisse Dämpfung der Schwenkbewegung.

Damit die Energieabgabe des Rotors unterhalb des Nennwindes verbessert wird, sollte das Rotorblatt mit zunehmendem Moment zunächst flacher in die Rotationsebene verstellt werden. Wird die Nennleistung erreicht und überschritten, muß die Verstellung in entgegengesetzter Richtung und mit wesentlich größeren Schritten erfolgen. Die erforderliche Blattverstellung ist qualitativ in Abb. 3 als Funktion der Windgeschwindigkeit angegeben, wobei die Nenngeschwindigkeit als Bezugsgröße dient.

Erfindungsgemäß soll diese Steuerfunktion durch zwei Steuerhebel erzeugt werden, die über den Steuerpunkt B1 am Massenarm des Drehzahlreglers auf die Steuerstange ST einwirken.

Abb. 4 zeigt eine vereinfachte Skizze: die Rotorhülse H dreht mit wachsendem Moment nach rechts, die Rotorwelle mit den beiden Hebelarmen nach links. Der Punkt B1 zusammen mit der Langlochstange S1 ersetzen jetzt den Endanschlag des Drehzahlreglers B in Abb. 1.

Skizze 4 deutet durch die verschieden langen Hebel, an denen S1 und S2 angreifen, die unterschiedlichen Arbeitswege an, die nach Abb. 3 notwendig sind. Man kann zusätzlich auch den Angriffspunkt B1 in zwei Punkte aufteilen, die verschiedene Abstände von der Drehachse des Drehzahlwächters besitzen.

In Abb.4 liegt B1 am oberen Rand des Langloches von S1, der sich mit wachsendem Moment aufwärts bewegen kann und damit das Blatt in Abb.2 in Richtung erhöhter Leistung verstellt. Als Verstellkraft steht die Integralfeder I des Drehzahlwächters zur Verfügung, da dessen Ansprechdrehzahl noch nicht erreicht ist. Die Langlochstange hat also eine Funktion als wäre der Anschlag B in Abb.1 variabel.

Wenn das Nennmoment erreicht wird, kommt die Langlochstange S2 zum Eingriff und zieht nun B1 nach unten in Richtung abnehmender Leistung. Das Langloch in S1 und S2, bzw. ein entsprechender Freiheitsgrad (z.B. bei Teleskopstangen) ist notwendig, damit die entgegengesetzten Steuerfunktionen sich nicht gegenseitig behindern. Außerdem ermöglichen diese Freiheitsgrade jederzeit z.B. bei Lastabwurf das unabhängige Eingreifen des Drehzahlwächters.

Da die Blattverstellung im Teillastbereich nur etwa 5° ausmacht, darüber aber bis zu sieben- oder achtfach größere Werte annehmen muß, ist es nicht leicht, die Steuerkurve der Abb.2 mit einer einzigen Drillfeder zu erreichen. Als Abhilfe kann man zwei verschieden harte Drillfedern hintereinander schalten und die weichere mit dem Nennmoment verspannen. Man kann dadurch erreichen, daß die harte Feder zwischen Null und Nennmoment einen gewissen Stellweg liefert und die vorgespannte weichere Feder zwischen Nennmoment und einem zulässigen Maximalwert wenigstens einen gleich großen Stellweg liefert. Die Schwingungsfähigkeit des Rotors in Schwenkrichtung wird also nichtlinear. Allerdings hat das nicht viel zu sagen, da die Schwenkeigenfrequenz i.a. weit unterhalb der Rotorfrequenz, d.h. weil unterhalb einer periodischen Erregung liegt.

Dennoch sollte man das Stellsignal des Drillwinkels nicht unmittelbar zur Blattverstellung herausziehen, wie man leicht für den Fall einer Windscherung erkennt: der größte Drehmoment des Rotorblattes tritt in der oberen Rotorlage auf, der größte Drillwinkel jedoch in der tiefsten Rotorlage. Dort sollte keineswegs der Blattwinkel reduziert werden, weil Windgeschwindigkeit und Drehmoment ohnehin schon den kleinsten Wert besitzen.

15.10.51
8

Deshalb soll das Stellsignal, wie in Abb.5 gezeigt wird, über eine Feder, die in Abb.5 der Deutlichkeit halber als Spiralfeder SP gezeichnet ist, als Kraft auf die Steuerstange ST übertragen werden. Zusammen mit dem Dämpfer D, der wieder als Luftbalg ausgebildet sein kann, wird dadurch eine langsame Verstellung des Rotorblattwinkels erzielt, die sich über mehrere Umläufe des Rotors verteilt.

Wenn im Inselbetrieb, d.h. ohne starre Führung durch ein elektrisches Netz, ein schnelles Erreichen der Solldrehzahl gewünscht wird, kann man die Teillaststeuerung durch den variablen Anschlag der S1-Stange realisieren und benötigt oberhalb der Nennlast nur noch den Drehzahlregler.

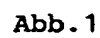
Sowohl bei der Drehzahlregelung als bei der Leistungsregelung kann man eine Variante vorsehen, die oberhalb der Nennleistung nicht auf konstante Drehzahl oder Leistung regelt, sondern den Schub des Rotors und damit die Turmbelastung konstant hält. Allerdings muß der Generator entsprechend belastbar und ein gewisser Drehzahlanstieg beim Inselbetrieb tolerierbar sein.

31 15 202

F03 D 7/00

15. April 1981

25. November 1982



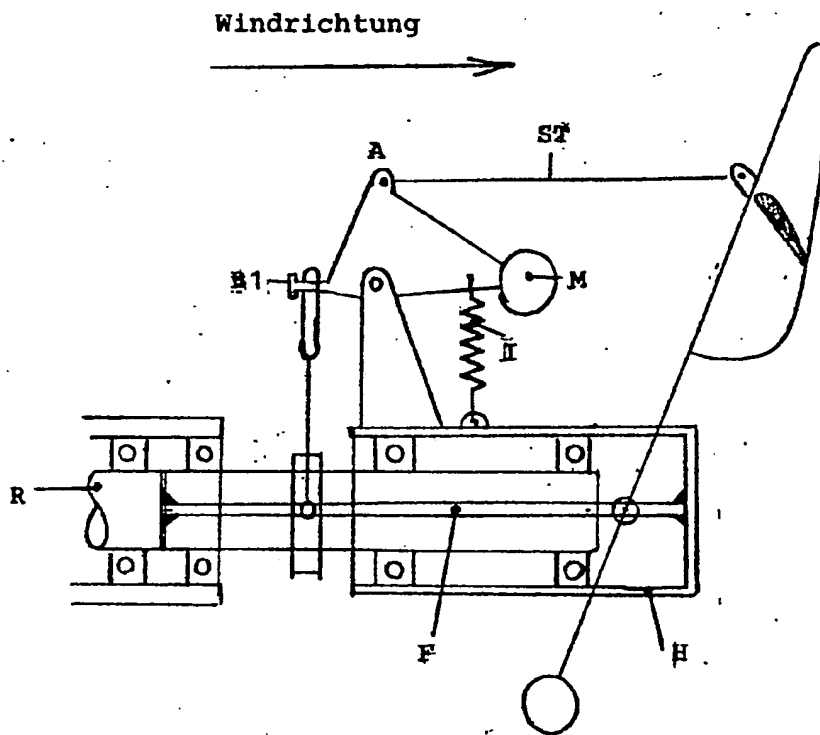


Abb. 2

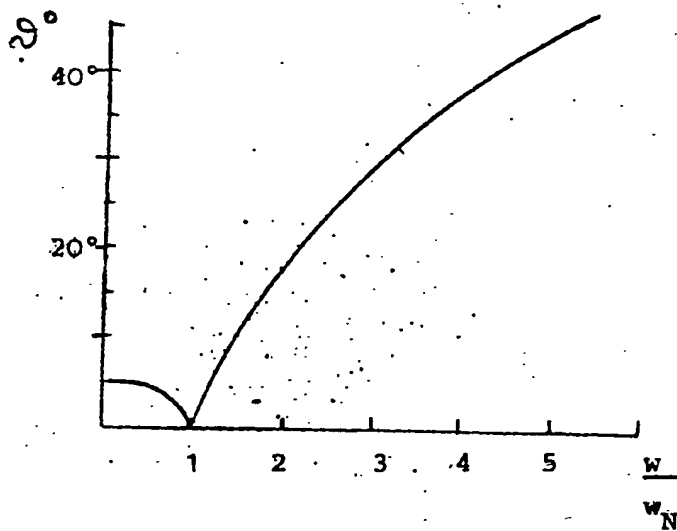


Abb. 3

15.04.81

3115202

10

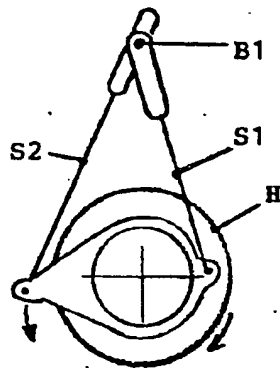


Abb. 4

Windrichtung

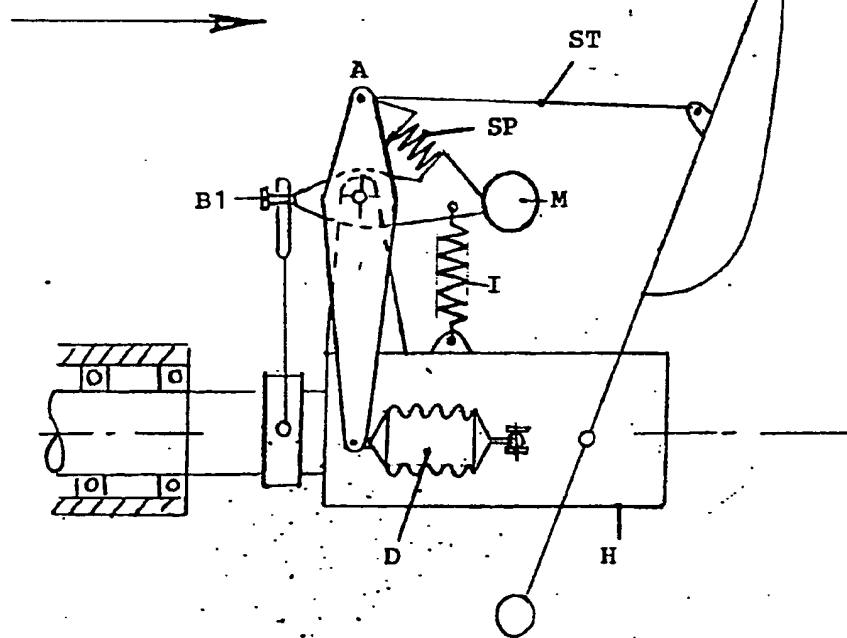


Abb. 5

15.04.81

3115202

10

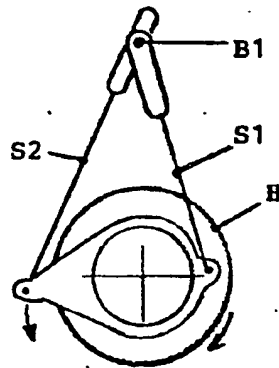


Abb. 4

Windrichtung

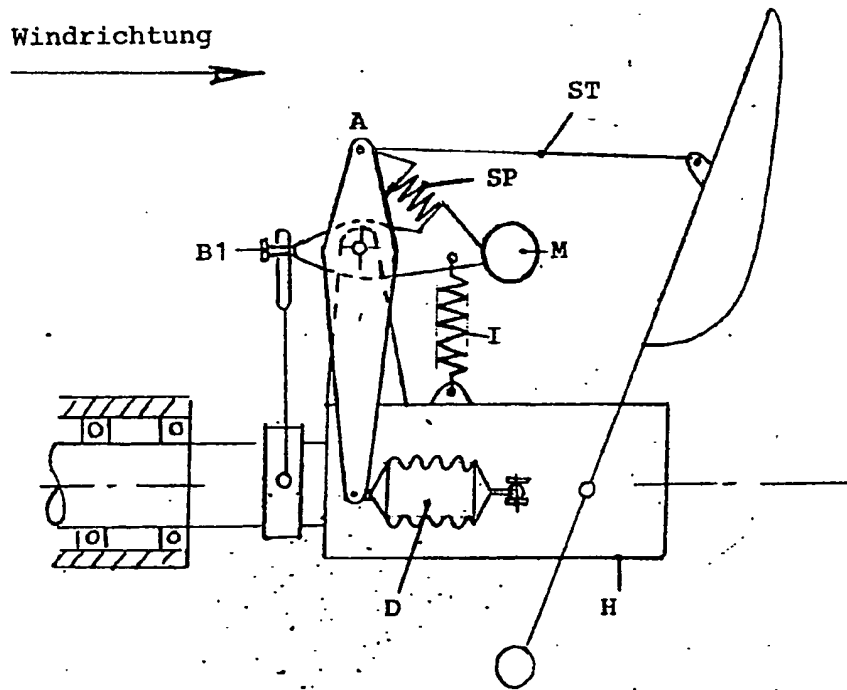


Abb. 5

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☒ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.